

高可靠性配电网

关键技术及应用

万凌云 主编
吴高林 宋伟 副主编
伏进 徐瑞林 主审



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

高可靠性配电网

关键技术及应用

万凌云 主 编
吴高林 宋 伟 副主编
伏 进 徐瑞林 主 审



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

2011年,重庆、北京、上海等六个城市开展了高可靠性示范供电区建设。本书立足于重庆高可靠性示范供电区和重庆城市配电网示范工程建设实践,系统介绍了高可靠性配电网在规划、设计、调度、运行、检修、故障处理等环节的关键支撑技术,以期为城市高可靠性供电区建设提供技术指导。

本书共分为6章,分别为绪论、配电网可靠性评估及优化技术、配电网实时风险评估预警技术、配电网合环换电技术、不停电作业技术、配电网生产抢修指挥一体化技术。

本书适用于从事配电网规划、设计、调度、运行、检修相关专业的工程技术及管理人员使用,也可供相关大中专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

高可靠性配电网关键技术及应用 / 万凌云主编. —北京:中国电力出版社, 2015.5

ISBN 978-7-5123-7183-5

I. ①高… II. ①万… III. ①配电系统-技术
IV. ①TM727

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第025340号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015年5月第一版 2015年5月北京第一次印刷

710毫米×980毫米 16开本 8.5印张 133千字

印数0001—2000册 定价29.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

主任 何国军

副主任 伏进 李志勇 徐瑞林

委员 吴高林 詹宏 刘军 张文斌

杨群英 宋伟

主编 万凌云

副主编 吴高林 宋伟

主审 伏进 徐瑞林

参编 詹宏 杨群英 谢开贵 刘军 张文斌

王艳 王宏刚 刘志宏 刘海涛 胡博

李杰 吕广宪 周静

序

近年来，我国电力用户供电可靠性迅速提高，不断达到新的、更高的标准。全国电力企业为此做出了巨大的努力，其中包括国网重庆市电力公司在内的一些供电企业，在高可靠性配电网建设方面开展了大量工作，进行了有益的探索和尝试。

本书以重庆电网工程实践为基础，是对重庆高可靠性示范供电区和重庆城市配电网示范工程建设实践的提炼总结，系统介绍了高可靠性配电网关键技术支撑体系，包括规划设计环节的配电网可靠性评估及优化技术、调度环节的配电网实时风险评估预警技术、运行环节的合环换电技术、检修环节的不停电作业技术和故障处理环节的配电网生产抢修指挥一体化技术，呈现了丰富的内容。所介绍的这些技术在整体上处于国内先进水平，并已在其他一些重点城市得到了推广应用。

本书的编写人员长期从事配电网技术研究和应用，很多人员直接参与了重庆高可靠性示范供电区和重庆城市配电网示范工程建设，具备扎实的理论基础及现场工程应用经验。在写作过程中，他们不断总结完善，数次修订易稿，倾注了极大的热情，终于完成《高可靠性配电网关键技术及应用》的编写。

作为国内在高可靠性配电网建设研究方面不多的科技类专著，希望本书的出版能够为国内其他城市开展高可靠性配电网建设提供借鉴和参考，促进有关技术的完善和发展，为提升我国城市电力用户供电可靠性水平起到积极的推动作用。

邹景行

2015年2月

随着我国经济的迅速发展和人民生活水平的不断提高,城市用户对供电可靠性的要求也越来越高。配电系统作为电力输送到用户的最后一环,与用户的联系最为紧密,对用户供电可靠性的影响也最为直接和显著。然而,传统配电系统使用的技术和管理手段已经难以满足高供电可靠性的需求。如何完善城市配电系统,进一步提高供电可靠性管理水平,满足日益增长的可靠供电需求,成为我国供电企业当前面临的迫切任务。

近年来,国内部分供电企业围绕如何提高城市用户供电可靠性水平进行了大胆创新和实践。2011年,重庆、北京、上海、天津等六个城市开展了高可靠性示范供电区建设。2012年,重庆、天津、济南、杭州等六个城市开展了城市配电网示范工程建设。2013年,重庆等城市开展了城市配电网示范工程拓展建设,深圳开展了城市高供电可靠性示范区建设。示范区的建设,显著提升了区域内用户供电可靠性水平,缩小了与国际先进水平的差距,对提升我国城市用户供电可靠性水平起到了示范和带动作用。

本书立足于重庆高可靠性示范供电区和重庆城市配电网示范工程建设实践,系统介绍了高可靠性配电网在规划、设计、调度、运行、检修、故障处理等环节的关键支撑技术,对高可靠性配电网关键技术支撑体系进行科学的阐释,以为城市高可靠性供电区建设提供技术指导,为提高配电系统的规划、建设、运行和管理水平,提升我国城市用户供电可靠性水平起到积极的推动作用。值得一提的是,部分技术已经在国内其他重点城市得到推广应用。

本书所介绍的内容是国网重庆市电力公司、国网重庆市电力公司电力科

学研究院、国网重庆市电力公司市区供电分公司、重庆大学、中国电力科学研究院、北京电研华源电力技术有限公司在配电系统研究领域近七年来研究和工程应用工作成果的总结，期间得到了国家自然科学基金项目、重庆市科技攻关项目、国家电网公司项目、国网重庆市电力公司项目的支持。在近七年的研究和应用过程中，还得到了来自广州南方电力集团科技发展有限公司、重庆樱花电气开关有限公司、重庆新世纪电气有限公司、积成电子股份有限公司等单位有关专家的大力帮助。在此，对他们表示衷心的感谢。

由于高可靠性配电网关键技术涉及面广泛，文中难免有疏漏、不足之处，恳请专家和读者批评指正。

编 者

2014年11月

序
前言

| | |
|------------------------------|----|
| 1 绪 论 | 1 |
| 1.1 现代配电网 | 1 |
| 1.2 供电可靠性水平及其发展阶段 | 2 |
| 1.3 高可靠性配电网的现实需求 | 3 |
| 1.4 高可靠性配电网关键技术体系 | 4 |
| 1.5 小结 | 4 |
| 2 配电网可靠性评估及优化技术 | 5 |
| 2.1 配电网可靠性评估指标 | 5 |
| 2.2 配电网可靠性评估方法 | 8 |
| 2.3 配电网可靠性优化技术 | 22 |
| 2.4 重庆城市配电网示范区可靠性评估及优化 | 28 |
| 2.5 小结 | 42 |
| 3 配电网实时风险评估预警技术 | 43 |
| 3.1 理论基础 | 43 |
| 3.2 应用技术研究 | 45 |
| 3.3 系统功能设计 | 46 |

| | | |
|----------|-----------------------|-----------|
| 3.4 | 应用实践 | 56 |
| 3.5 | 小结 | 56 |
| 4 | 配电网合环换电技术 | 58 |
| 4.1 | 合环换电的潜在风险 | 58 |
| 4.2 | 合环换电的技术原理 | 59 |
| 4.3 | 配电网合环换电装置 | 63 |
| 4.4 | 仿真计算及试验 | 65 |
| 4.5 | 应用实践 | 68 |
| 4.6 | 小结 | 70 |
| 5 | 不停电作业技术 | 71 |
| 5.1 | 不停电作业技术分类 | 71 |
| 5.2 | 电缆网不停电作业技术难点及解决方案 | 72 |
| 5.3 | 电缆网不停电作业原理 | 73 |
| 5.4 | 旁路布缆车的应用 | 74 |
| 5.5 | 应急旁路配变车的应用 | 74 |
| 5.6 | 应用实践 | 76 |
| 5.7 | 小结 | 83 |
| 6 | 配电网生产抢修指挥一体化技术 | 84 |
| 6.1 | 配电网生产抢修指挥一体化的概念 | 84 |
| 6.2 | 配电网生产抢修指挥一体化关键技术 | 85 |
| 6.3 | 配电网生产抢修指挥一体化平台设计与实现 | 97 |
| 6.4 | 配电网生产抢修指挥一体化平台应用 | 106 |
| 6.5 | 小结 | 117 |
| | 参考文献 | 119 |

绪 论

1.1 现代配电网

在我国，按电压等级可将配电系统划分为高压配电系统、中压配电系统和低压配电系统三部分。高压配电系统与输电系统直接相连，接收来自输电系统的电能，直接向大负荷供电或经中、低压配电系统向负荷供电。我国目前的高压配电系统一般指 35、66kV 或 110kV 配电系统，有些大型城市也将 220kV 作为高压配电系统电压等级，以适应城市用电规模的增长。高压配电系统的电源一般来自不同的 220kV 或 500kV 变电站。中压配电系统一般指 10kV 和 20kV 配电系统，通常将高压配电变电站的每一回中压出线称为一条馈线。低压配电系统一般指 0.4kV 配电系统。习惯上，配电系统有时也被简称为配电网或配网。本书介绍的内容主要涉及中压配电网。

中压配电网一般具有以下特征：① 设备规模庞大；② 多采用辐射型、环式或网格式等结构方式，正常情况下多为辐射状运行；③ 运行方式多变，系统状态变化频繁；④ 线路分支多，负荷和电源以及各种配电装置沿馈线和馈线分支线不均匀分散分布；⑤ 大部分设备和节点不具备实时测录运行参数的条件。

近年来，随着现代信息技术、通信技术和计算机技术的发展，配电网在信息化和自动化方面取得较大进展。配电地理信息系统（GIS）、配电数据采集与监视控制（SCADA）系统、配电自动化（DA）系统、用电信息采集系统、生产管理系统、负荷控制系统、营销管理系统等被广泛应用于配电网运行和管理，极大促进了配电网运行和管理水平的提升。

未来的配电网将通过应用和融合先进的测量和传感技术、控制技术、计算机和网络技术、信息与通信技术等，集成各种具有高级应用功能的信息系统，利用智能化的开关设备、配电终端设备等，实现配电网在正常运行状态下可靠的监测、保护、控制和优化，并在非正常运行状态下具备自愈控制功

能，最终为电力用户提供安全、可靠、优质、经济、环保的电力供应和其他增值服务。

1.2 供电可靠性水平及其发展阶段

世界上供电可靠性的发展历程大体分为三个阶段：低可靠性水平阶段、迅速发展阶段和高可靠性水平阶段。供电可靠性三个阶段的发展变化如图 1-1 所示。

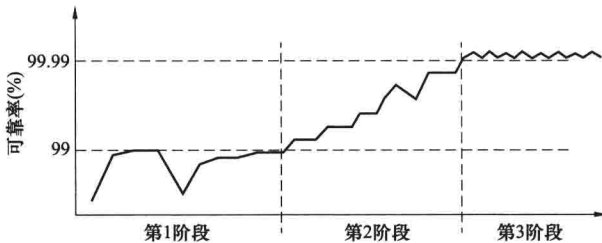


图 1-1 供电可靠性三个发展阶段的发展变化

(1) 低可靠性水平阶段。低可靠性水平阶段是供电可靠性发展的初级阶段。此阶段供电可靠率一般在 99% 以下，对应的用户平均停电时间一般在 87.6h 以上，并且每年的供电可靠率指标波动很大。

(2) 迅速发展阶段。供电可靠性水平迅速增长，供电可靠率一般在 99% 以上，对应的停电时间一般在 87.6h 以下。供电可靠性指标的总体发展趋势是螺旋式上升，每年的供电可靠率指标有一定的波动，但其波动范围要比第一阶段小。

(3) 高可靠性水平阶段。供电可靠性水平已增加到很高，供电可靠率指标一般在 99.99% 以上，对应的用户平均停电时间一般在 0.876h (约 53min) 以下。每年的供电可靠率指标较稳定，只有很小的波动，其波动范围比第一阶段和第二阶段都要小。

目前，美、英、法、日等发达国家的供电可靠性水平较高，图 1-2 给出了日本东京电力公司 1980~2005 年供电可靠率指标的变化趋势。

从图 1-2 可知，日本东京电力公司 1986 年以后的供电可靠率都在 99.99% 以上，对应的用户平均停电时间基本上在 0.876h (约 53min) 以下。也就是说，日本东京电力公司供电可靠率在 1986 年以前处于可靠性发展阶段中的第二阶段，1986 年以后即进入了第三阶段。

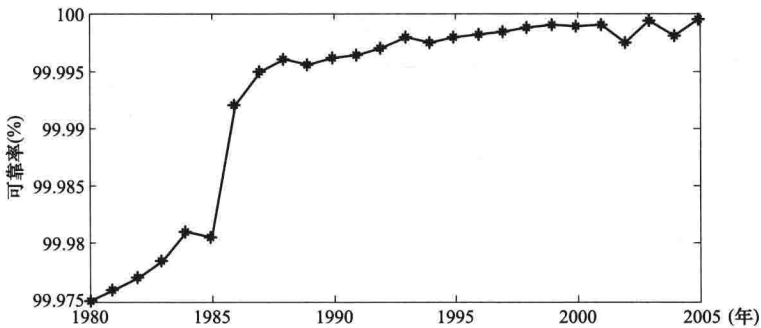


图 1-2 东京电力公司供电可靠性发展曲线

目前，新加坡是世界上供电可靠性最高的城市，2009年的供电可靠率已经达到 99.999 9%，用户年均停电次数 0.01 次。

1.3 高可靠性配电网的现实需求

相对于国外发达城市而言，我国城市仍处于快速发展阶段。经过多年的发展，我国城市供电可靠性水平逐步提高。图 1-3 给出了我国城市电网 1991~2006 年 10kV 城市用户平均供电可靠率指标变化趋势。从图 1-3 可知，1992 年以后我国城市供电可靠率达到了 99% 以上。也就是说，1992 年以前我国处于可靠性发展阶段中的第一阶段，1992 年以后即进入了第二阶段，正在向第三阶段靠近。2013 年，我国城市用户平均供电可靠率为 99.958%，少数城市供电可靠率达到了 99.98%。总体来看，我国配电网供电可靠性水平与先进国家还存在较大差距。

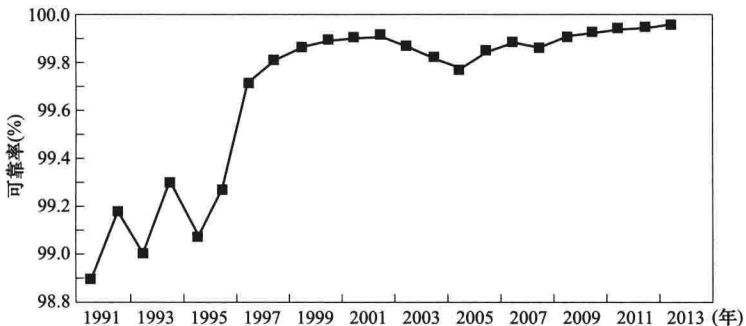


图 1-3 我国 10kV 城市用户平均供电可靠率变化趋势

以外，随着我国经济社会的迅速发展，城市居民用户和企事业单位对供电可靠性的需求越来越高，单位停电时间造成的社会损失越来越大。传统的配电网技术和管理手段已经越来越难以满足高供电可靠性的需求。因此，开展高可靠性配电网关键技术研究显得越来越迫切。

1.4 高可靠性配电网关键技术体系

供电可靠性是配电网规划、设计、建设、调度、运行、检修、故障处理等环节技术和管理水平的综合体现。高供电可靠性必然要求配电网规划、设计、建设、调度、运行、检修、故障处理等环节技术和管理水平全面提升。电网规划设计环节的配电网可靠性评估及优化技术、电网调度环节的配电网实时风险评估预警技术、电网运行环节的合环换电技术、电网检修环节的不停电作业技术和故障处理环节的配电网生产抢修指挥一体化技术，这些技术共同构成了高可靠性配电网关键技术支撑体系。

1.5 小结

近年来，我国在配电网信息化和自动化方面取得较大进展，极大地促进了配电网运行和管理水平的提升。目前，我国用户供电可靠性水平处于快速发展阶段，正在向高可靠性水平阶段靠近。

此外，随着我国经济社会的迅速发展，城市居民用户和企事业单位对供电可靠性的需求越来越高，单位停电时间造成的社会损失越来越大。传统的配电网技术和管理手段已经难以满足高供电可靠性的需求。

供电可靠性是配电网规划、设计、建设、调度、运行、检修、故障处理等环节技术和管理水平的综合体现。为实现高供电可靠性，提出了构建以配电网可靠性评估及优化技术、配电网实时风险评估预警技术、合环换电技术、不停电作业技术和配电网生产抢修指挥一体化技术为核心的高可靠性配电网关键技术支撑体系。

配电网可靠性评估及优化技术

据统计, 大约有 80% 的停电事故缘于配电网故障。同时, 为提高配电网规划、建设及改造的科学决策水平, 合理利用资金, 有必要利用基于概率方法的配电系统可靠性评估技术和综合考虑投资、运行费用和停电损失的年最小费用方法来进行方案决策。国外的实践表明, 使用这一技术不但可获得显著的社会效益, 而且可以取得重大的经济效益。因此, 开展配电网可靠性评估及优化技术研究具有重要的现实意义。

本章首先介绍了配电网可靠性评估指标体系及评估方法, 接着详细阐述了含配电自动化系统的配电网可靠性评估模型和算法, 以及开关优化配置模型及方法。最后, 以重庆城市配电网示范区为例对本章所介绍内容作进一步阐述。

2.1 配电网可靠性评估指标

配电网可靠性评估指标可分为三类, 即负荷点可靠性指标、用户可靠性指标、受停电影响的用户可靠性指标。

2.1.1 负荷点可靠性指标

假设配电网中的某负荷点与向它供电的电源之间有 n 台设备, 其中第 i 台设备的故障率为 λ_i (次/年), 故障修复时间为 γ_i (h/次)。由于连接在配电网任一负荷点上的用户都要求它与向它供电的电源之间的所有设备正常运行, 因此, 可以应用网络简化法来定义和计算配电网负荷点可靠性指标。

(1) 负荷点停运率 λ

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (\text{次/年}) \quad (2-1)$$

(2) 负荷点每次故障平均停电持续时间 γ

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (\text{h/次}) \quad (2-2)$$

(3) 负荷点年平均停电时间 U

$$U = \lambda \gamma \quad (\text{h/年}) \quad (2-3)$$

2.1.2 用户可靠性指标

常用的配电网用户可靠性指标如下。

(1) 系统平均停电频率指标 *SAIFI* (system average interruption frequency index)。系统平均停电频率指标 *SAIFI* 是指每个由系统供电的用户在单位时间内所遭受到的平均停电次数，计算式如下

$$SAIFI = \frac{\sum_i \lambda_i N_i}{\sum_i N_i} \quad [\text{次/ (用户} \cdot \text{年)}] \quad (2-4)$$

式中 N_i ——负荷点 i 的用户数；

λ_i ——负荷点 i 的故障率。

(2) 系统平均停电持续时间指标 *SAIDI* (system average interruption duration index)。系统平均停电持续时间指标 *SAIDI* 是指每个由系统供电的用户在一年中所遭受的平均停电持续时间，计算式如下

$$SAIDI = \frac{\sum_i U_i N_i}{\sum_i N_i} \quad [\text{h/ (用户} \cdot \text{年)}] \quad (2-5)$$

式中 U_i ——负荷点 i 的等值平均停电时间。

(3) 系统平均供电可用率指标 *ASAI* (average service availability index)。系统平均供电可用率指标 *ASAI* 是指一年中用户获得的不停电时间总数与用户要求的总供电时间之比。如果一年中用户要求的供电时间按全年 8760h 计，则系统平均供电可用率指标 *ASAI* 可按式计算

$$ASAI = \frac{8760 \sum_i N_i - \sum_i U_i N_i}{8760 \sum_i N_i} \quad (2-6)$$

(4) 系统电量不足指标 ENS (energy not supply)。系统电量不足指标 ENS 是指系统中停电负荷的总停电量, 其计算式为

$$ENS = \sum L_{a(i)} U_i \quad (\text{kWh/年}) \quad (2-7)$$

式中 $L_{a(i)}$ ——连接在停电负荷点 i 的平均负荷, kW, 它等于负荷点 i 的年峰荷与负荷系数的乘积。

2.1.3 受停电影响的用户可靠性指标

(1) 用户平均停电频率指标 $CAIFI$ (customer average interruption frequency index)。用户平均停电频率指标 $CAIFI$ 是指一年中每个受停电影响的用户所遭受的平均停电次数, 可按下式计算

$$CAIFI = \frac{\sum_i \lambda_i N_i}{\sum_{j \in EFF} N_j} \quad [\text{次/ (停电用户} \cdot \text{年)}] \quad (2-8)$$

式中 EFF ——受停电影响的负荷点的集合, 受停电影响的用户一年内不管其被停电的次数有多少, 每户只计算一次。

(2) 用户平均停电持续时间指标 $CAIDI$ (customer average interruption duration index)。用户平均停电持续时间指标 $CAIDI$ 是一年中被停电的用户所遭受的平均停电持续时间, 可以用一年中用户停电持续时间的总和除以该年停电用户总次数来估计

$$CAIDI = \frac{\sum_i N_i U_i}{\sum_i \lambda_i N_i} \quad [\text{h/ (停电用户} \cdot \text{年)}] \quad (2-9)$$

由上述可靠性指标计算式可以看出, 进行配电网可靠性评估计算时需要以下数据:

——配电系统结构 (设备组成), 如电气接线图/各负荷点负荷情况、用户数等;

——组成该配电系统中各设备的可靠性统计参数, 包括设备故障率、故障修复时间等;

——为分析判断系统故障状态而可能需要计算供电系统潮流所必备的一些基础数据等。

2.2 配电网可靠性评估方法

自 1965 年电力系统可靠性领域的一系列学术论文问世以来,配电网可靠性评估在数据统计以及评估模型、评估算法等方面都形成了较为成熟的方法。但在工程实践过程中,尚存在一些问题没有得到很好的解决,比如主网、变电站主接线、架空线同杆架设以及配电自动化对配电网可靠性的影响。为此,本节将在传统的配电网可靠性评估方法基础上,介绍计及主网、变电站主接线、架空线同杆架设以及配电自动化影响的配电网可靠性评估模型和方法。

2.2.1 配电网可靠性评估方法概述

目前,工程上普遍应用的配电网可靠性评估方法有解析法和模拟法两大类。

解析法:根据元件之间的功能关系,用公式显式表示系统的可靠性评估模型,通过模型直接计算可靠性指标的方法。其原理简单、模型准确,已广泛应用于配电网可靠性评估,而且便于有针对性地进行不同元件性能对电网可靠性的影响分析。

模拟法是指运用计算机产生随机数对系统元件的失效事件随机抽样,构成系统失效事件集,并通过概率统计方法建立可靠性指标计算公式的一种电力系统可靠性评估模拟方法。

配电网可靠性评估的传统方法为故障模式后果分析法(failure-mode-and-effect analysis, FMEA):利用元件可靠性数据,选择合适的故障判断准则,然后根据该准则将系统状态分为正常运行和故障两大类,进而进行可靠性计算。FMEA 法适用于对简单辐射状主馈线系统进行可靠性评估,对带有复杂分支馈线的系统,由于故障模式太多,直接使用 FMEA 法有相当困难,同时,这种方法没有考虑线路传输容量等的限制,使计算结果与实际相差较大。

近年来,国内外科技工作者已提出许多中压配电网可靠性评估方法:

(1) 网络等值法。该方法的基本思想是利用一个等效元件来代替一部分配电网,从而将复杂结构的配电网逐步简化成简单辐射状主馈线系统。对复杂配电网的可靠性评估含向上和向下等效两个过程,其存在以下不足:① 需对子系统进行连续多次等效;② 只能得到等效负荷和系统可靠性指标,如果要得到每个负荷点的可靠性指标,还需从等效负荷出发逐步向下分解,计算过程复杂。

(2) 故障扩散法。该方法提出边界节点、N 度节点的概念,根据故障时间